

# SN 1987 A : une supernova très brillante dans le Grand Nuage de Magellan

La découverte, le 24 février 1987, de l'explosion d'une supernova très brillante dans le Grand Nuage de Magellan (GNM) a suscité une agitation euphorique sans précédent au sein de la communauté astronomique. En effet, un tel événement cataclysmique, visible à l'œil nu, ne se produit qu'environ une fois tous les 250 ans et celui du mois de février 1987 a conduit à la première détection de neutrinos extragalactiques émis au cours de l'effondrement du noyau d'une étoile massive. De plus, SN 1987A a fourni aux astronomes une occasion unique de sonder spectroscopiquement les milieux interstellaires et intergalactiques sur une distance de 165 000 années-lumière.

Actuellement, les théoriciens tentent de concilier les nombreuses observations réalisées dans les divers domaines spectraux ( $\gamma$ , X, visible, infra-rouge, radio) avec les modèles d'évolution d'étoiles massives juste avant et après l'explosion fatale. Nous présentons ci-après un résumé des observations et des résultats déjà obtenus et nous décrivons les profets d'observations futures.

## SN 1987A : un événement tout à fait inattendu.

Selon les statistiques ayant trait aux apparitions de supernovae dans des galaxies voisines, 4 supernovae galactiques seulement devraient être visibles à l'œil nu, en l'espace de 1000 ans, par un observateur terrestre. La surprise a donc été très grande au sein de la communauté astronomique, lorsque, le 24 février 1987, un télégramme de l'Union Astronomique Internationale (UAI) nous a appris qu'une supernova de magnitude visuelle voisine de 4,5, c'est-à-dire facilement visible à l'œil nu, était apparue dans le Grand Nuage de Magellan. En réalité, trois découvertes indépendantes de cet événement ont été annoncées dans la circulaire n° 4316 de l'UAI. La première supernova de l'an 1987 a été identifiée par Ian Shelton (astronome à la station de l'Université de Toronto

située à l'Observatoire de Las Campanas au Chili), le 24 février à 5,5 T.U., sur un cliché photographique obtenu avec un astrographe de 25 cm. La même nuit, Ocar Duhalde (assistant de nuit au même observatoire américain de Las Campanas) et Albert Jones (astronome amateur à Nelson en Nouvelle-Zélande) ont découvert SN 1987A à l'œil nu à 4,8 h et 7,9 h T.U. respectivement.

L'apparition de SN 1987A constitue un événement vraiment unique, le taux d'apparition de supernovae dans le GNM étant d'environ une tous les 500 ans et la dernière observation d'une supernova brillante remontant à l'an 1604. La supernova qui avait été observée il y a 383 ans est apparue dans la constellation d'Ophiuchus, dans la direction du centre de notre Galaxie, à une distance d'environ 30 000 années-lumière. Des observations de SN 1604 ont été décrites par Képler et d'autres astronomes contemporains qui ne disposaient pas encore de télescope.

Immédiatement après la découverte de SN 1987A, la plupart des télescopes radio et optiques de l'hémisphère sud ont été pointés vers cet objet en évolution très rapide. Par chance, plusieurs photographies du GNM ont été prises dans différents observatoires juste avant et après l'explosion. La position de SN 1987A est évidente sur la figure 2. La figure 3 illustre, avec plus de détails, la région du ciel près de 30 Doradus dix ans avant et trois jours après l'explosion stellaire. Ces photographies ont été prises à l'European Southern Observatory (E.S.O.) au Chili.

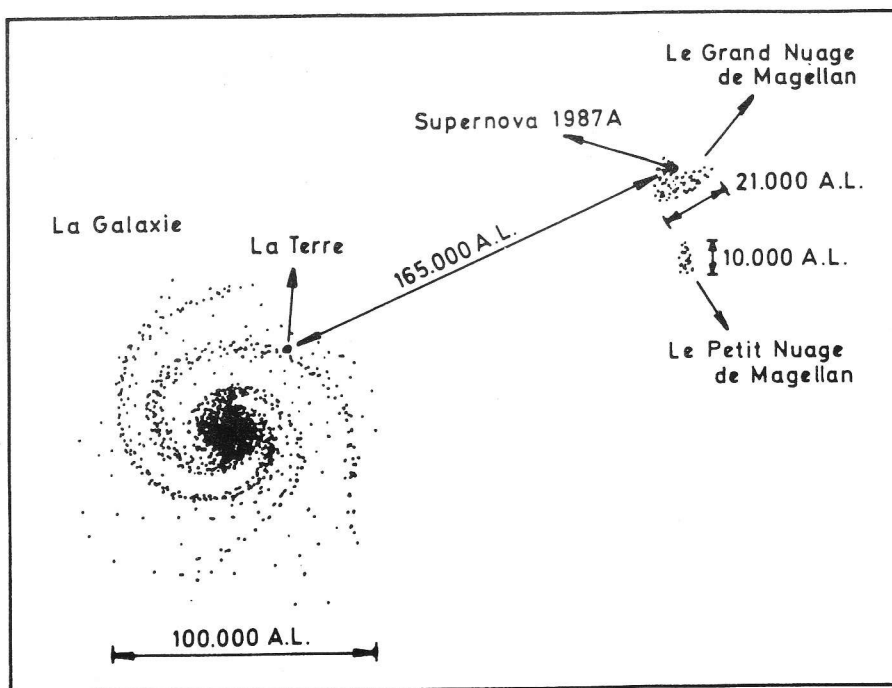
## Le précurseur de SN 1987A

Toutes les étoiles appartenant au GNM s'éloignent de nous avec une vitesse moyenne de 260 km/s, et sont situées, en bonne approximation, à la même distance  $d = 165\,000 \pm 10\,000$  années-lumière de nous. La mesure de la vitesse radiale de SN 1987A, située dans la direction du GNM, nous indique que cet objet appartient aussi à cette galaxie, d'où nous déduisons une même distance de 165 000 années-lumière pour la supernova.

Ceci nous permet de représenter dans un diagramme donnant la magnitude absolue en fonction de la température effective, connu sous le nom de diagramme de Hertzsprung-Russell, chaque étoile membre du GNM ainsi que SN 1987A et son précurseur. On sait que dans un tel diagramme, les points représentatifs d'étoiles ne sont pas distribués au hasard mais sont situés sur des trajets d'évolution théoriques qui sont uniquement fonctions des conditions initiales (masse, composition chimique, etc.). A condition de pouvoir identifier le précurseur de SN 1987A, nous avons une occasion unique de comprendre les derniers stades d'évolution d'une étoile massive.

Très vite, une étoile supergéante bleue de magnitude visuelle 12,2, connue sous le nom de Sk - 69° 202, a été identifiée comme le meilleur candidat précurseur. Un examen très détaillé des photographies obtenues avant l'explosion montre que cette étoile avait 2 compagnons situés respectivement à 3" et 1,5". Des mesures astrométriques très précises indiquent, à une précision meilleure que 0,1", une coïncidence parfaite entre les

Figure 1 - Position schématique de SN 1987A dans le Grand Nuage de Magellan (GNM). L'explosion stellaire qui a conduit à l'apparition de SN 1987A dans le GNM a eu lieu dans la nuit du 23 au 24 février 1987. Le GNM et le Petit Nuage de Magellan (PNM) sont deux galaxies satellites de la Voie Lactée, situées à une distance approximative de 165 000 années-lumière. Puisque la lumière émise par la supernova a voyagé pendant 165 000 années, nous observons ce phénomène cataclysmique dans le GNM tel qu'il s'est produit avant l'apparition de l'Homo-Sapiens sur Terre. Le GNM et le PNM sont deux galaxies visibles à l'œil nu dans le ciel de l'hémisphère austral.



positions de SN 1987A et Sk - 69° 202. En outre, les données spectroscopiques obtenues en avril 1987 avec le satellite IUE (1) montrent clairement que les deux compagnons de Sk - 69° 202 sont encore présents et que c'est bien la supergéante bleue qui a disparu. Après quelques moments d'hésitation, on admet maintenant que Sk - 69° 202 est bien l'étoile "précurseur" de SN 1987A.

Pourtant, d'après les modèles standards d'évolution stellaire, il n'était généralement pas prévu que le précurseur d'une supernova puisse être une supergéante bleue. Les théoriciens ont donc été confrontés à devoir expliquer ce comportement "exotique" de Sk - 69° 202. Comment se peut-il qu'une supergéante bleue ait donné naissance à une supernova ?

### La naissance d'une supernova ou la mort d'une étoile massive.

Les supernovae sont généralement réparties en deux classes principales I et II. Les supernovae de type I sont observées dans des galaxies spirales, elliptiques et irrégulières. Le premier type, Ia, résulte probablement d'une accréation de matière par une naine blanche membre d'un système binaire serré (figure 5), tandis que le type Ib correspondrait au stade explosif final d'une étoile de type Wolf-Rayet dépourvue d'hydrogène en surface. Le spectre de ces supernovae ne présente aucune raie d'hydrogène en absorption. Il se fait que ces raies ont été très vite détectées dans le spectre de



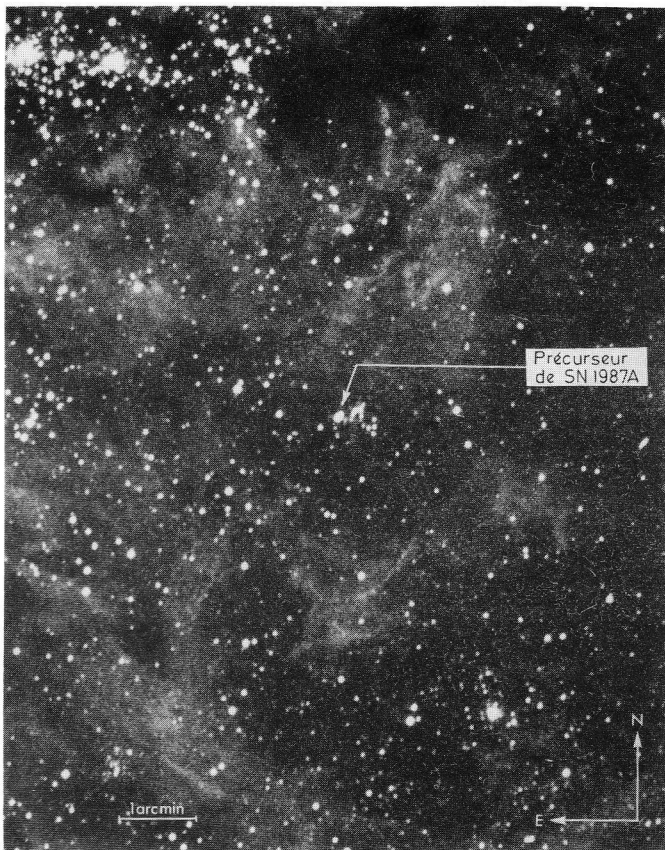
Figure 2 - Le Grand Nuage de Magellan et SN 1987A.

Sur cette photo du Grand Nuage de Magellan, la supernova SN 1987A brille, deux jours après l'explosion fatale, de ses feux les plus étincelants. Ce cliché a été obtenu par C. Masden le 25 février à 1h T.U. avec un appareil photographique de type Hasselbad (pose de 20 minutes sur une émulsion Agfachrome 1000 RS) à l'Observatoire Européen Austral (Chili). La supernova a alors atteint une magnitude de 4,5 et est devenue un objet facilement visible à l'oeil nu. SN 1987A est la plus brillante des supernovae qui soit apparue depuis 383 ans. La Tarentule (30 Doradus) qui ressort aussi très bien sur ce cliché est une nébuleuse géante d'hydrogène qui est ionisée par un amas d'étoiles chaudes (cliché ESO).

Figure 3 - Environnement immédiat de SN 1987A avant et après l'explosion.

Ces deux clichés photographiques obtenus avec le télescope de Schmidt de l'ESO illustrent l'apparition soudaine de SN 1987A dans le GNM. Le cliché de gauche (de droite) a été pris par H.E. Schuster et O. Pizarro (G. Pizarro) sur une émulsion Ila-O et avec un filtre UG1 (GG385) lors d'une pose de 60 (15) minutes, le 9 décembre 1977 (26 février 1987 à 1h 25mn T.U.). La position exacte du précurseur de SN 1987A est repérée sur le cliché de gauche au moyen d'une flèche. Entre les deux instants où les clichés ont été pris, la luminosité de SN 1987A a augmenté de plus d'un facteur 1500. D'autres documents ont montré que cette évolution abrupte a eu lieu en moins de 24 heures (Clichés ESO).

(1) International Ultraviolet Explorer





## SUPERNOVA REMNANTS AND THE INTERSTELLAR MEDIUM

Edited by R.S. ROGER et T.L. LAN-DECKER

Les supernovae et leurs rémanents jouent un rôle essentiel dans l'évolution du disque galactique en y injectant des éléments lourds et des rayons cosmiques et en fournissant de l'énergie à la matière interstellaire. Le milieu enveloppant une supernova et leurs débris fut le thème du Colloque n° 101 de l'U.A.I. tenu en juin 1987. Le livre est le compte-rendu des travaux présentés à ce colloque, travaux théoriques aussi bien qu'observationnels. Avec l'intérêt soulevé par SN 1987A le bilan de ces travaux est particulièrement bien venu.

## THE CRAB NEBULA AND RELATED SUPERNOVA REMNANTS

Edited by Minas C. KAFLOS and Richard B.C. HENRY

La Nébuleuse du Crabe, M 1, est le plus important rémanent de supernova du ciel. Depuis le colloque à elle seule consacrée, en 1970, les CCD, les progrès de la radio-astronomie et de l'astronomie des rayons X ont fourni une flopée de haute qualité d'informations spectrales et morphologiques. Le point se devait d'être fait et ce fut le thème de travail d'un colloque tenu à l'Université Georges Mason en octobre 1984.

L'ouvrage présenté ici est le "up-to-date" de l'astronomie des rémanents de supernovae ; les nouvelles idées regroupées ici incluent les rémanents de type nébuleuses-du-Crabe du Grand Nuage de Magellan, le modèle magnétohydrodynamique de radiation du Crabe et le fameux jet de la Nébuleuse du Crabe. Des données recueillies par les satellites I.U.E. et I.R.A.S. sont incluses dans ce livre.

**Cambridge University Press**

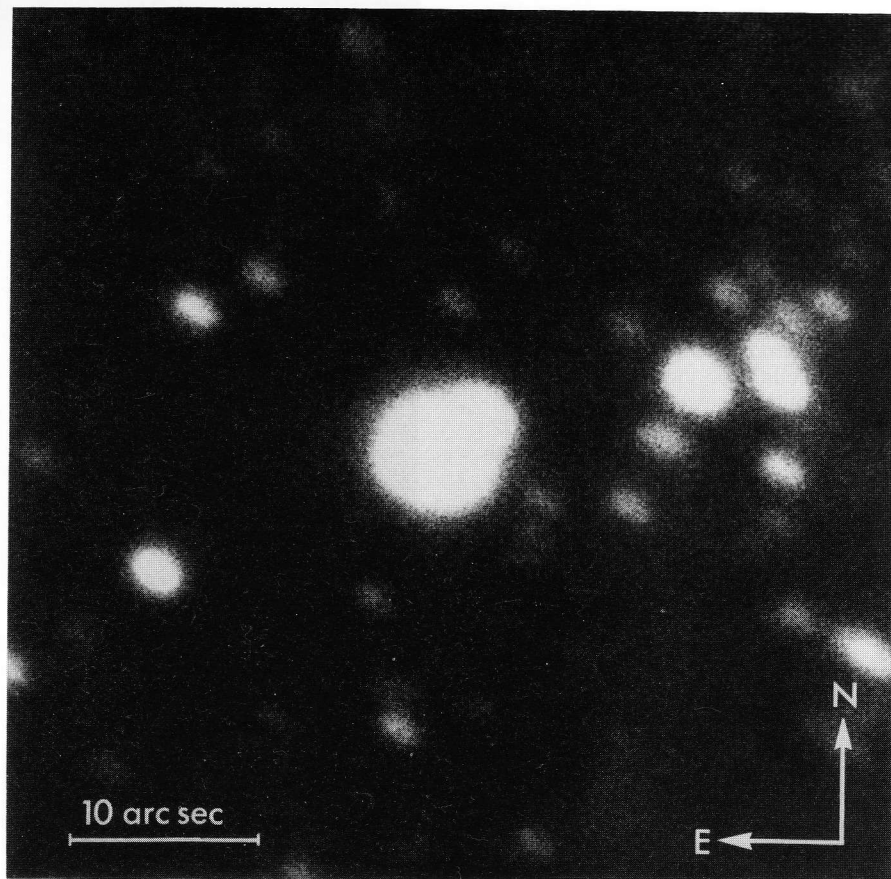


Figure 4 - Le précurseur de SN 1987A.

Le précurseur de SN 1987A est identifié sur cette photographie obtenue en lumière rouge à l'aide du télescope de l'ESO de 3,6 m, le 6 décembre 1979. Il s'agit de l'étoile OB de 12<sup>e</sup> magnitude cataloguée en 1969 par Sanduleak sous la dénomination Sk -69°202. Des observations faites à l'ESO au cours des années 1970 montrent que cette étoile est de type B3I, c'est-à-dire de température effective 15 000°K, de rayon  $3 \cdot 10^{12}$  cm, de luminosité  $1,3 \cdot 10^5$  fois celle du Soleil et de masse 15 masses solaires. Une analyse détaillée de ce cliché a toutefois révélé que le précurseur possédait deux compagnons stellaires. On voit que l'image de Sk -69°202 est quelque peu allongée dans la direction N-O du fait qu'un des compagnons (mv 15,3) est situé à une distance de 3" dans cette direction. Une troisième étoile (mv 15,7) a été découverte à 1,5" au S-E de Sk -69°202. Notons que les images stellaires sur cette photo sont situées très près du bord de la plaque où la mise au point est moins bonne, ce qui explique leur allongement (Cliché ESO).

SN 1987A et on sait par ailleurs que celles-ci sont caractéristiques du spectre des supernovae de type II. Ces dernières sont attribuées à l'explosion d'une étoile massive dont le noyau de fer s'effondre. L'onde de choc qui accompagne le collapse produit l'expulsion cataclysmique des couches extérieures (figure 6). Il est dès lors intéressant de comparer les observations de SN 1987A avec celles typiques des supernovae de type II.

### Observations photométriques et spectroscopiques de 1987A

Faisant suite à l'évolution très rapide aussi bien de sa courbe de lumière que de son spectre, SN 1987A apparaît être une supernova particulière de type II. La figure 7 représente la courbe de lumière visible de SN 1987A jusqu'à environ 300 jours après sa découverte. Au tout début, on peut noter les caractéristiques suivantes :

1) Après l'effondrement du noyau stellaire qui s'est produit le 23 février à 7,35

h T.U. (un signal neutrinique dont nous reparlerons ci-après a été détecté à cet instant précis), la luminosité de SN 1987A a augmenté de manière très abrupte. Un premier maximum de luminosité visuelle était atteint le 28 février au moment où l'onde de choc a traversé la photosphère de l'étoile. Cependant, la luminosité du pic était environ 7 fois plus faible que celle prévue pour une supernova de type II. De plus, la radiation ultraviolette émise par SN 1987A a diminué de plus d'un facteur 1000 en moins de trois jours alors qu'en même temps l'objet apparaissait de plus en plus brillant dans le rouge et l'infra-rouge.

2) Dès le deuxième jour après l'explosion, de très larges profils de raies de type P Cygni ont été détectées pour les raies de la série de Balmer de l'atome d'hydrogène dans le spectre de SN 1987A (figure 8). Comme nous l'avons signalé plus haut, des vitesses d'expansion extraordinaires ont été mesurées : celles-ci ont atteint 30 000 km/s.

Afin de rendre compte du développement rapide de la courbe de lumière de

SN 1987A, les théoriciens ont suggéré que le précurseur devait être un objet beaucoup plus compact qu'une supergéante rouge. Pour le cas d'un précurseur possédant une atmosphère très dense, comme celle d'une supergéante bleue, une grande partie de l'énergie émise lors de l'explosion serait dissipée sous forme d'énergie cinétique au lieu d'être rayonnée dans le spectre électromagnétique, et c'est exactement ce qui a été observé pour SN 1987A. Une estimation de l'énergie cinétique de l'enveloppe en expansion pour cette supernova conduit à une valeur d'environ  $10^{51}$

ergs alors que l'énergie rayonnée est estimée à  $10^{48}$  ergs dans le visible et à  $10^{47}$  ergs dans l'ultra-violet. Un tel scénario permet de rendre compte de la faible luminosité de maximum visuel observé 5 jours après l'explosion de Sk - 69° 202. Il faut noter ici que le déclin rapide de la radiation UV et l'accroissement du flux lumineux aux grandes longueurs d'onde sont dus au refroidissement rapide de l'atmosphère en expansion.

L'analyse de photographies directes correspondant à la phase pré-explosive et des spectres de SK - 69° 202 obtenus au moyen d'un prisme-objectif ont

apporté de nouveaux résultats intéressants. Premièrement, aucun signe de variabilité photométrique ou spectroscopique n'a été détecté pour cette étoile au cours des dernières décennies. une raie d'azote très marquée a toutefois été identifiée dans le spectre du précurseur. Des analyses spectrales d'autres supergéantes bleues du GNM montrent aussi que certaines d'entre elles ont des abondances élevées en éléments lourds (He, N, etc.). par ailleurs, des études théoriques ont montré que des modèles d'étoiles massives ( $M \approx 15-20$  masses solaires) sujettes à des phénomènes de

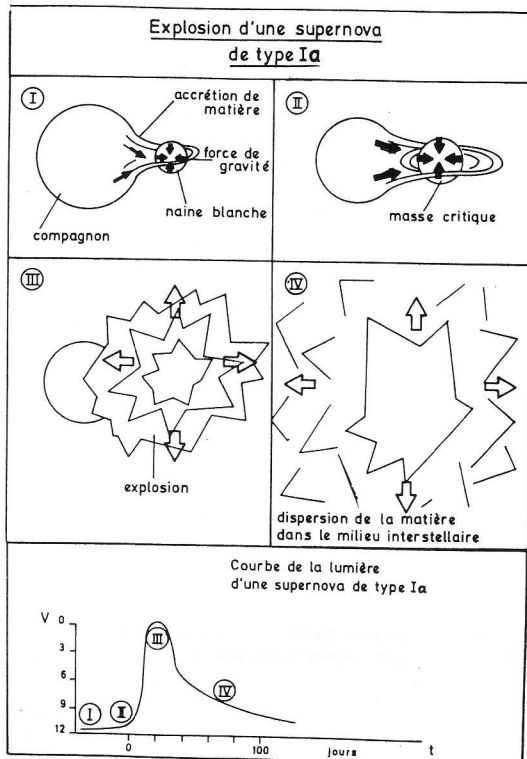


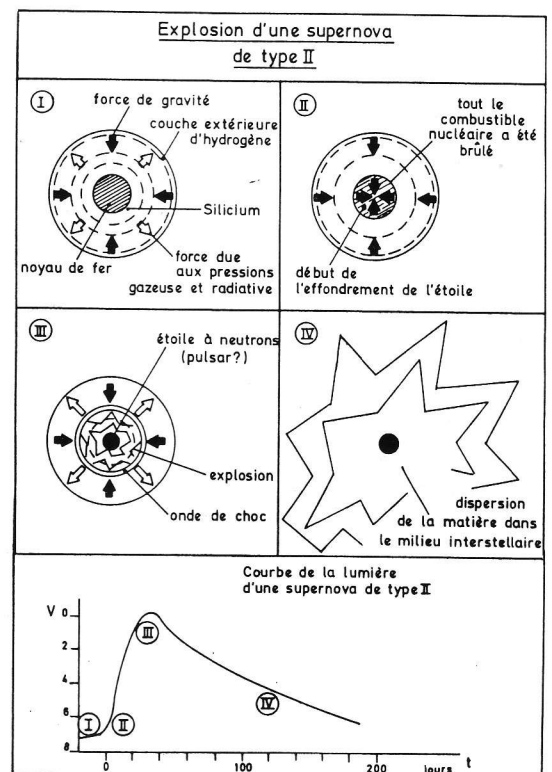
Figure 5 - Les différentes phases de l'explosion d'une supernova de type Ia.

Les astrophysiciens pensent que les supernovae de type Ia sont produites dans des systèmes binaires au sein desquels une naine blanche constituée de carbone et d'oxygène arrache graduellement de la matière à l'atmosphère géante de son compagnon (I). Une naine blanche est une étoile « fossile » dont le rayon est comparable à celui de la Terre et sa masse à celle du Soleil. La masse volumique d'une telle étoile est donc d'environ 1 tonne par  $\text{cm}^3$ . C'est la pression due aux électrons dégénérés qui empêche un tel objet d'être comprimé davantage. Cependant, lorsque la masse de la naine blanche atteint la valeur critique de 1,4 masse solaire, l'étoile s'effondre littéralement (II). Un stade de combustion nucléaire explosive provoque alors la dislocation de la naine blanche (III). La matière de celle-ci est dispersée dans le milieu interstellaire (IV). La forme de la courbe de lumière d'une supernova de type Ia traduit la façon dont une énorme quantité d'énergie est rayonnée à la suite de l'explosion. La magnitude visuelle absolue du maximum est de l'ordre de -18,7, soit  $10^9$  fois plus brillante que le Soleil. Après le maximum, la courbe de lumière présente un déclin rapide.

Figure 6 - Les différentes phases de l'explosion d'une supernova de type II

Au cours de son évolution, une étoile traverse une série de phases de combustion nucléaire centrale séparées par des phases de contraction gravifique du noyau. Ces combustions, qui altèrent progressivement la composition chimique des couches centrales, sont d'autant plus nombreuses que la masse initiale est élevée. Dans le noyau d'une étoile de masse supérieure à 10 masses solaires, les atomes d'hydrogène ont formé des atomes d'hélium, eux-mêmes transformés en carbone, puis en oxygène jusqu'à la formation du fer. L'étoile présente alors une structure en pelures d'oignon : le cœur de l'étoile est entouré de couches constituées d'éléments dont le poids

atomique diminue vers l'extérieur (silicium, aluminium... hydrogène) (I). Pour une étoile de 8 à 10 masses solaires, le phénomène de supernova est associé au démarrage explosif de la combustion de l'oxygène dans le noyau en contraction rapide à la suite du phénomène de neutronisation. Le phénomène de supernova dans une étoile de masse supérieure à 10 masses solaires se produit lorsque le noyau de fer, de masse supérieure à la masse limite de Chandrasekhar, entame une contraction accélérée par la réduction de la pression électronique due aux captures d'électrons. Les nombreux neutrinos libérés lors des processus de capture s'accumulent dans une « neutrinosphère ». Lorsque la masse volumique centrale atteint une valeur typique de la valeur nucléaire, le collapse est brutalement freiné alors qu'il reste aussi important dans la zone externe du noyau. Une onde de choc prend naissance ; elle possède une énergie éventuellement suffisante pour éjecter les couches extérieures au noyau et donne lieu après environ  $10^{-4}$  seconde au phénomène de supernova. L'onde de choc peut aussi être trop faible mais, grâce à la diffusion des neutrinos hors de la neutrinosphère, elle peut se transformer en une onde de choc suffisamment énergétique. L'explosion survient alors après un délai typique du temps de diffusion des neutrinos soit de l'ordre de 1 seconde (III). Des vitesses d'expansion de l'ordre de 30 000 km/s ont été mesurées à partir de l'analyse de profils de raies de type P Cygni observés pour les raies de la série de Balmer dans le spectre de SN 1987A. Notons que pendant les premières phases de l'explosion, la température et la pression sont extrêmement élevées de telle sorte que les éléments plus lourds que le fer (uranium, nickel...) sont synthétisés. On pense maintenant que les éléments lourds présents sur Terre ont dû être synthétisés lors de l'explosion d'une supernova. Dans ce contexte, le Soleil apparaît comme une étoile de seconde voire de troisième génération, formée à partir de la matière dispersée d'une supernova (IV). La magnitude visuelle absolue au maximum de luminosité d'une supernova de type II vaut typiquement -16,6, soit dix mille fois moins lumineuse que le maximum d'une supernova de type I. Le déclin post-maximum d'une supernova de type II n'est toutefois pas aussi brutal que celui d'une supernova de type I.





pertes de masse réalistes et caractérisées par de faibles métallicités (2), semblables à celles mesurées dans le GNM (environ 1/4 de la valeur solaire) conduisent tout naturellement à une supergéante bleue comme précurseur d'une supernova de type II après une éventuelle phase de géante rouge associée à la fin de la combustion centrale de l'hélium et au stade initial de formation d'une couche de combustion de l'hélium. Ces modèles prévoient aussi que la fréquence des étoiles supergéantes bleues est plus élevée dans le GNM que dans la Voie Lactée, ce qui est en bon accord avec les observations existantes.

Un autre aspect inattendu de la courbe de lumière de SN 1987A est que, après avoir atteint un premier maximum le 28 février 1987, sa brillance a diminué légèrement pour remonter ensuite à partir du 5 mars pendant environ 3 mois. La magnitude visuelle apparente du nouveau maximum était atteinte aux environs du 24 mai et valait 2,8. Comme l'énergie produite par l'onde de choc a été libérée au cours des 5 premiers jours, une autre source d'énergie est nécessaire pour produire l'augmentation de la luminosité entre le 5 mars et le 24 mai.

chrotron du fait de leur accélération dans des champs magnétiques très intenses.

Toutefois, il devient de plus en plus probable que l'excès de lumière observé soit dû à l'énergie libérée par la désintégration radioactive d'isotopes instables synthétisés au cours des toutes premières phases qui ont suivi l'explosion. Une analyse détaillée de la courbe de lumière (voir figure 7) montre en effet que, à partir du 140<sup>e</sup> jour après la découverte de SN 1987A, la luminosité visuelle de la supernova a diminué exponentiellement avec une période de décroissance de 114 jours, ce qui est en bon accord avec la période de désintégration de 111,26 jours du <sup>56</sup>Co.

Par ailleurs, dès l'annonce de la découverte de SN 1987A, des essais de détection de rayonnement X et  $\gamma$  ont été réalisés. Au début, ces essais ont été vains du fait de la trop grande opacité de l'atmosphère de la supernova à ces rayonnements mais, à partir du 15 juin 1987, le satellite Ginga (3) a observé du rayonnement X en provenance de la supernova (cf. circulaire n° 4447 de l'UAI). De même, plusieurs observations ont mis en évidence, à partir d'août 1987, une émission de rayonnement  $\gamma$  à 847

Cependant, si un tel objet existe réellement, il est très probable que l'atmosphère opaque en expansion devienne d'abord transparente au rayonnement X et radio. Etant donné que SN 1987A est une supernova particulière de type II, il est difficile de prédire le moment précis à partir duquel le résidu de l'explosion deviendra observable.

Les détections de neutrinos en provenance de SN 1987A constituent sans aucun doute la meilleure preuve qu'une étoile à neutrons a bien été formée au centre de la supernova.

### Premières détections de neutrinos extra-solaires.

Ainsi que nous l'avons mentionné page 46, les théoriciens avaient prévu une forte émission de neutrinos et anti-neutrinos pendant les phases de neutronisation, de rupture de la neutrinosphère et de diffusion des neutrinos hors du noyau de Sk - 69° 202. C'était donc une grande première lorsqu'un groupe de physiciens italo-soviétiques ont annoncé dans les circulaires UAI n° 4323

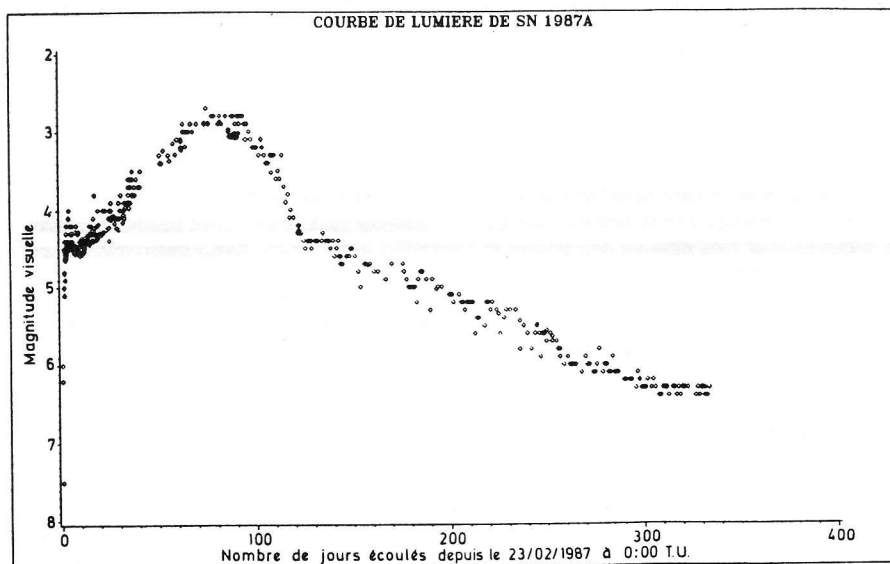


Figure 7 - Courbe de lumière de SN 1987A

Cette figure représente la magnitude visuelle apparente de la supernova en fonction du temps. La plupart des mesures sont tirées des circulaires de l'UAI publiées entre le 24 février 1987 et le mois de janvier 1988. Remarquons la décroissance linéaire de la magnitude de SN 1987A en fonction du temps à partir du 140<sup>e</sup> jour après l'explosion. Cette décroissance exponentielle de la luminosité de la supernova est en bon accord avec celle de l'émission de rayons  $\gamma$  émis lors de la désintégration du <sup>56</sup>Co en <sup>56</sup>Fe (voir texte).

Plusieurs sources d'énergie possible ont été invoquées. Certains auteurs ont suggéré que l'excès de radiation visible pourrait être dû à la recombinaison d'électrons et d'ions dans la matière éjectée du précurseur, enrichie en éléments lourds (N, O, ...). D'autres ont fait appel à une source d'énergie centrale alimentée par la rotation rapide (période inférieure à 10 millisecondes) d'une étoile à neutrons pour rendre compte de l'évolution de la courbe de lumière. Un tel pulsar produirait des électrons relativistes émettant un rayonnement syn-

keV (cf. circulaires UAI n° 4510, 4526 et 4527) et à 1238 keV (cf. circulaire UAI n° 4527). Ces émissions sont une conséquence directe de la désintégration du <sup>56</sup>Co en <sup>56</sup>Fe. Le flux mesuré pour l'émission à 847 keV, de l'ordre de  $10^{-3}$  photons  $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ , équivaut à la désintégration de  $2,3 \cdot 10^{-4}$  masses solaires de <sup>56</sup>Co visible, soit environ 0,3 % de la quantité de <sup>56</sup>Co qui, d'après la courbe de lumière aurait été présente en août 1987. Tout comme le rayonnement visible, les rayons X durs trouvent leur origine dans la dégradation des rayons  $\gamma$  qui interagissent avec la matière de l'atmosphère de la supernova.

La photométrie rapide de SN 1987A entreprise dans plusieurs observatoires n'a jusqu'à présent donné lieu à la détection d'aucune variabilité optique qui témoignerait de la présence d'un pulsar.

(28 février 1987) et n° 4332 (6 mars 1987) qu'un signal en provenance du GNM avait été détecté le 23 février 1987 à l'Observatoire Neutrino du Mont Blanc. Ce détecteur de neutrinos est situé dans le tunnel du Mont Blanc entre la France et l'Italie et est composé de liquide scintillateur protégé du rayonnement cosmique de fond par des plaques de fer très lourdes. Cinq neutrinos ont été détectés le 23 février 1987 pendant une durée de 7 secondes à partir de 2 h 52 mn 37 s T.U. et la probabilité que cet événement soit dû au hasard a été évalué à une fois tous les 10 000 ans.

La surprise fut encore plus grande lorsqu'un autre groupe américano-japonais de physiciens des particules élémentaires annonça (circulaire UAI n° 4338) que l'expérience de Kamiokande II avait détecté une série de neutri-

(2) La métallicité est définie comme étant la fraction en masse de l'ensemble des éléments plus lourds que l'hélium.

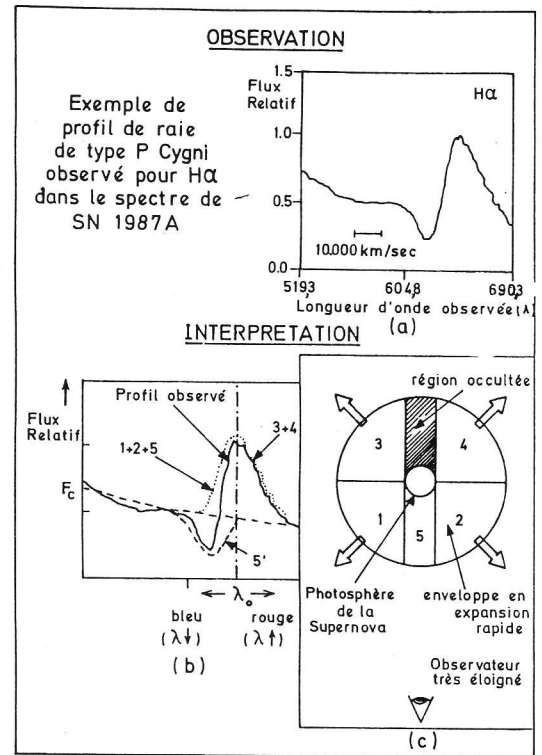
(3) Le satellite japonais Ginga a été lancé récemment pour l'observation en rayons X

Figure 8 - Profil de raie de type P Cygni

Nous avons reproduit dans le diagramme (a) une portion du spectre de SN 1987A observé le 27 février 1987 par J. Danziger et R. Fosbury avec un spectrographe Boller et Chivens attaché au foyer Cassegrain du télescope de 3,6 m de l'ESO (cf. The Messenger 47,32). L'intervalle spectral choisi illustre le profil de type P Cygni dû à la raie H $\alpha$  de la série de Balmer de l'atome d'hydrogène.

Le profil de raie de type P Cygni est généralement formé d'une composante centrale en émission (contributions 1+2+5 et 3+4 représentées en (b)) flanquée sur son aile bleue d'une composante en absorption (contribution 5' en (b)). La formation d'un tel profil de raie résulte essentiellement de la redistribution en longueur d'onde des photons émis dans une transition radiative entre deux niveaux atomiques discrets à la suite d'importants effets Doppler dus aux mouvements d'expansion rapide d'une enveloppe autour d'un objet central (voir le schéma (c)). Ainsi, les photons émis par les atomes d'hydrogène qui s'approchent d'un observateur éloigné (régions 1,2 et 5 représentées en (c)) donnent lieu à la formation de la composante bleue en émission. De même, l'émission de photons par les atomes qui s'éloignent de l'observateur (régions 3 et 4 en (c)) rendent compte de la composante rouge en émission. Enfin, l'absorption du continuum  $F_c$  émis par la photosphère de la supernova par les atomes situés entre le disque stellaire et l'observateur (région 5 en (c)) donne naturellement lieu à la formation d'une composante décalée vers les courtes longueurs d'onde.

Nous avons aussi indiqué dans le diagramme (a) l'intervalle de longueur d'onde qui correspond à des mouvements Doppler de l'enveloppe en expansion équivalent à 10 000 km/s. En divisant par deux la largeur totale du profil observé, on peut ainsi déduire que les vitesses d'expansion de l'enveloppe autour de SN 1987A étaient supérieures à 18 000 km/s le 27 février 1987. Une analyse plus approfondie des profils de raies de type P Cygni observés dans le spectre de SN 1987A devrait permettre de déduire des variations du taux de perte de masse au cours du temps, les conditions physiques (température et densité) régnant au sein de l'enveloppe en expansion, la distribution du champ de vitesse et bien d'autres paramètres physiques.



nos et antineutrinos en provenance de SN 1987A le 23 février 1987 à 7 h 35 mn 35 s  $\pm$  1 minute, c'est-à-dire plus de 4 heures après la détection du Mont-Blanc. Le signal consistait en 11 neutrinos et antineutrinos qui ont produit des électrons et positrons dans un détecteur Cerenkov à eau situé au fond d'une mine de zinc à Kamioka, dans l'ouest du Japon. Les événements ont eu lieu pendant un intervalle de 13 secondes et les énergies des électrons et positrons allaient de 7,5 MeV à 36 MeV. Par ailleurs, l'Observatoire Neutrino de Irvine-Michigan-Brookhaven (IMB) situé dans une mine de sel sous le lac Érié dans l'Ohio, a signalé dans le circulaire n° 4340 du 11 mars 1987, la détection de 8 neutrinos le 23 février 1987 à 7h35mn41s T.U., c'est-à-dire en coïncidence avec celle de Kamiokande. Parmi les huit événements enregistrés au

cours d'un intervalle de 6 secondes, 5 ont eu lieu au cours des premières secondes. Les énergies mesurées se distribuent dans un intervalle de 20 à 40 MeV. L'expérience de IMB consiste également en un détecteur image Cerenkov (figure 10). Les détections de Kamiokande II et IMB ont été confirmées plus tard par le Laboratoire de Physique de Baksan en Union Soviétique qui aurait détecté des événements neutriniques d'énergies supérieures à 5 MeV, pendant un intervalle de 9,1 secondes. Le décalage temporel de 20 secondes entre ces détections et celles des groupes précédents a été expliqué par des problèmes de synchronisation d'horloges.

Il semble plausible que l'Observatoire du Mont Blanc n'ait pu enregistrer les événements de 7h35mn T.U. si l'on sait que sa capacité de détection est environ vingt fois moindre que celle des autres

centres. Néanmoins, il est difficile de comprendre pourquoi les expériences de Kamiokande II et IMB n'ont pas confirmé l'observation du Mont Blanc. Le délai de 4h43mn entre les différentes détections reste donc incompris. Une des hypothèses avancées permettant de lever partiellement cette difficulté consiste à expliquer la première détection de neutrinos en termes de la formation d'une étoile à neutrons transformée quelques heures plus tard en un trou noir, mais elle se heurte à de sérieux problèmes.

Les observations neutriniques de Kamiokande et IMB ont indiqué que SN 1987A doit avoir rayonné environ  $3 \cdot 10^{53}$  ergs sous forme de neutrinos et antineutrinos. Cette énergie est en excellent accord avec l'estimation théorique de l'énergie potentielle qui serait libérée lors de l'effondrement d'un noyau stellaire de 1,6 masse solaire. Un pourcent seule-

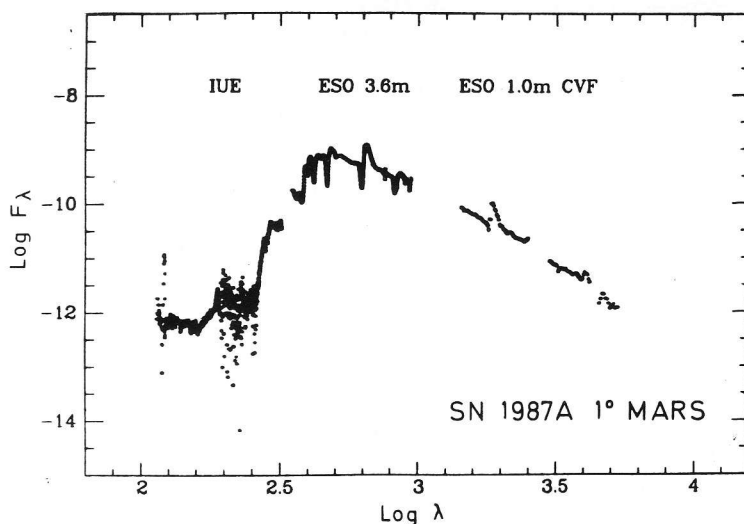


Figure 9 - Spectre composite de SN 1987A Cette figure illustre le spectre composite de SN 1987A obtenu à partir des spectres enregistrés à l'aide du satellite IUE, du télescope de 3,6 m de l'ESO et du télescope de 1 m de l'ESO pour les domaines ultraviolet, visible et infra-rouge, respectivement. Dans les domaines visibles et infra-rouge, la distribution spectrale peut être approchée par une distribution de Planck d'un corps noir à une température de 5800°K, tandis que la partie ultraviolette dévie d'une telle distribution, à cause de l'absorption par des raies de résonance et de faible excitation propres à des éléments ionisés une fois (FeII, SiII, etc.). Les raies spectrales de plusieurs éléments se distinguent par des pics ou des discontinuités dans le continuum photosphérique. A la fin du mois de juin 1987, l'enveloppe en expansion se refroidissait ( $\approx 5000^\circ\text{K}$ ) tout en se raréfiant. Il y avait aussi des signes de la présence d'un excès de radiation IR ( $T \approx 1200^\circ\text{K}$ ). Il est possible que cet excès soit dû à un écho IR du rayonnement UV et visible émis lors de l'arrivée de l'onde de choc dans la photosphère de la supernova. Ce rayonnement chauffe les grains de poussière qui, formant une enveloppe circumstellaire, réémettent par la suite, du rayonnement IR. Notons que, dans cette figure, l'échelle de longueur d'onde, en nm, et l'échelle des ordonnées, en  $\text{erg cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{nm}^{-1}$ , sont logarithmiques (repris de l'article de Danziger et al., 1987, Astronomy and Astrophysics, 177, L13).



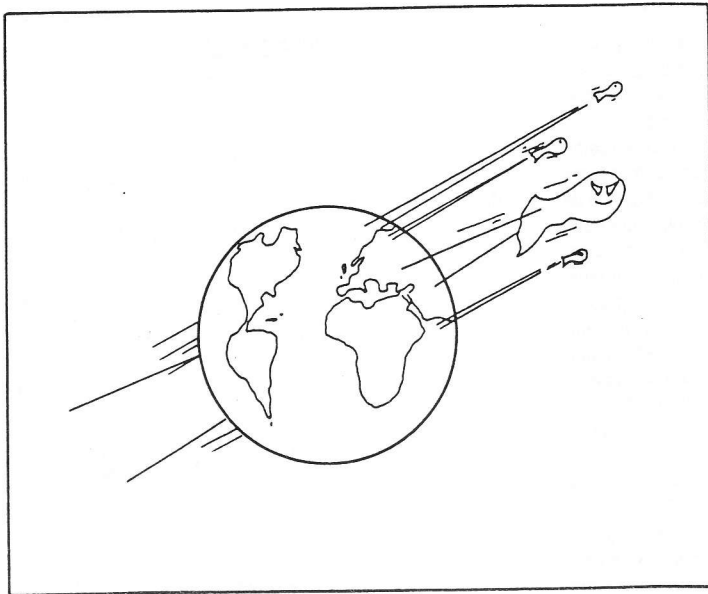


Figure 10 - Des particules fantomatiques, les neutrinos.

Le 23 février 1987, vers 7h35mn TU, chacun de nous a été traversé par environ  $10^{15}$  neutrinos et antineutrinos émis lors de l'explosion de Sk - 69°202. Pourtant, cela nous est passé inaperçu parce que la probabilité d'interaction d'une telle particule avec un noyau atomique du corps humain est très faible. La plupart de ces particules ont traversé la Terre sans subir d'interaction. C'est pour cette raison que les observatoires à neutrinos sont constitués d'énormes tanks d'eau purifiée ou de liquide scintillateur munis de milliers de détecteurs très sensibles situés à de très grandes profondeurs. Pour un observateur terrestre, le nombre de neutrinos en provenance de SN 1987A était typiquement de  $10^{10}$  antineutrinos électroniques par  $\text{cm}^2$  parmi lesquels deux dizaines seulement ont été détectés.

ment de cette énergie de liaison sert à entretenir l'expansion de la matière éjectée et 0,01 % est rayonnée sous forme de rayonnements visibles et ultraviolets. On peut donc admettre que le modèle standard décrivant l'explosion d'une supernova de type II, incluant un processus d'effondrement du noyau, est essentiellement correct. Comme les détections de neutrinos ont lieu plusieurs heures avant l'augmentation de luminosité de la supernova, on en déduit que les neutrinos ont dû parcourir la distance de 165 000 années lumière avec une vitesse proche de celle de la lumière. D'après la relativité restreinte, cela implique que la masse du neutrino et de l'antineutrino doit être faible. Utilisant le fait que les neutrinos possédant les énergies les plus basses auraient mis plus de temps à parcourir la distance GNM-Terre et que les délais observés entre leur temps d'arrivée est, au plus, de quelques secondes, on trouve une limite supérieure de 15 eV pour la masse au repos des neutrinos et antineutrinos électroniques (4). Remarquons toutefois que si l'émission des neutrinos à la source n'a pas eu lieu de façon instantanée (cf. processus de diffusion, etc.), une masse au repos nulle est en tout aussi bon accord avec les observations.

Ces constatations nous permettent d'affirmer que dans le système de référence d'un observateur terrestre, la durée de vie d'un neutrino est supérieure à 165 000 années. Par conséquent, la déficience en flux de neutrinos solaires mesuré jusqu'à présent sur Terre ne peut être expliquée par une oscillation du neutrino entre l'état électronique et un autre.

En résumé, la détection de neutrinos en provenance de SN 1987A constitue un pas en avant sans précédent dans notre compréhension de la physique des particules et des explosions de supernova-

vae de type II. Ce grand succès a déjà conduit à des projets de constructions de super-observatoires de neutrinos. L'astronomie des neutrinos est réellement née le 23 février 1987.

#### SN 1987A, sonde des milieux interstellaire et intergalactique.

Avec une magnitude visuelle record de 2,8, SN 1987A est devenue en mai 1987 l'objet le plus brillant du GNM. Elle était alors environ dix mille fois plus brillante que les étoiles les plus lumineuses du GNM et on peut dire que SN 1987A est l'objet le plus brillant qui ait jamais été observé aussi près de notre Galaxie. Aussi, a-t-elle constitué une source de lumière inespérée pour étudier la structure physique et dynamique des milieux interstellaire et galactique le long d'une distance de 165 000 années-lumière. Un nombre impressionnant de raies en absorption étroites formées dans le milieu interstellaire du GNM et de la Voie Lactée, dans le halo de notre Galaxie et dans les nuages intergalactiques ont été observées dans des spectres à haute résolution de SN 1987A. La plupart de ces données ont été obtenues grâce au satellite IUE et au spectromètre Coudé Echelle (CES) du Télescope Coudé Auxiliaire de 1,4 m de l'ESO (CAT). Six composantes d'une raie de magnésium (MgI) et d'autres attribuées au nickel (NiII), au zinc (ZnII) et au silicium (SiIV) ont été identifiées dans le spectre ultraviolet de SN 1987A. Pas moins de 24 composantes en absorption dues au calcium (CaII), 13 au sodium (NaI) et deux au potassium (KI) ont été identifiées dans les spectres optiques (figure 11). Ces observations indiquent la présence d'un véritable pont de matière entre notre Galaxie et le GNM. Il est probable aussi que certaines de ces raies en absorption soient produites dans de la matière éjectée par Sk - 69° 202 au cours d'une phase rapide de perte de matière qui a précédé l'explosion de SN 1987A.

La brillance de SN 1987A aussi permis aux astrophysiciens d'estimer avec une précision remarquable une limite supérieure de la concentration de l'isotope traceur  $^7\text{Li}$  dans le gaz intergalactique. Ce résultat est très important car il permet de mettre une contrainte sur les théories de la nucléosynthèse primordiale et donc de les préciser.

Enfin, le spectre de SN 1987A a récemment permis de mettre en évidence la présence des radicaux CH et  $\text{CH}^+$  aussi bien dans le gaz du GNM que dans celui de l'espace intergalactique.

#### Dernières nouvelles de SN 1987A

Adoptant une distance de 165 000 années-lumière pour SN 1987A et une vitesse de 10 000 km/s pour l'expansion de la matière éjectée, il est facile d'estimer, que, 9 mois après l'explosion, l'enveloppe de la supernova devrait être observable depuis la Terre sous un diamètre angulaire d'environ 20 millisecondes d'arc. Il est remarquable qu'une telle séparation angulaire, correspondant à un diamètre linéaire de 1000 années-lumière, ait été mesuré avec succès au moyen de techniques interférométriques de tavelures (circulaire UAI n° 4457).

Par ailleurs, un résultat supplémentaire intéressant a été annoncé dans la circulaire UAI n° 4382. Des observations "speckle" à haute résolution angulaire ont montré, vers la fin mars, la présence d'un objet non résolu à 57 millisecondes d'arc au sud de la supernova. Celui-ci était 2,7 magnitudes plus que faible au SN 1987A dans une bande passant étroite centrée sur la raie H $\alpha$ . Cet objet lumineux a été appelé la "tache mystérieuse". Plusieurs interprétations ont été proposées pour expliquer l'origine de cette tache lumineuse. L'une d'entre elles fait appel à la formation de jets relativistes produits lors de l'effondrement du noyau stellaire en rotation, qui se ferait préférentiellement le long de l'axe de rotation. Il en résulterait des jets

(4) On accepte actuellement l'idée qu'il existe 3 sortes de neutrinos, chacun étant associé à une particule (électron, muon, tauon) et que toute particule possède son antiparticule.

de matière alignés parallèlement à l'axe de rotation. D'autres auteurs ont émis l'hypothèse selon laquelle le « spot » s'est produit dans un nuage dense de matière protostellaire situé au voisinage de la supernova. Lors de l'arrivée de l'onde de choc dans la photosphère, le rayonnement ultraviolet intense émis aurait produit quelques jours plus tard des ionisations dans la matière nébulaire et, par suite, lors des processus de recombinaison, un rayonnement important dans le visible et l'infra-rouge aurait été mis (écho). Si cette hypothèse est correcte, on devrait s'attendre à recevoir, d'ici un an ou deux, du rayonnement X à la suite du passage de l'onde de choc dans ce même nuage.

Les observations interférométriques dans l'infra-rouge ne semblent cependant pas mettre en évidence la présence d'une telle tache brillante. Par contre, elles ont établi l'existence d'une structure

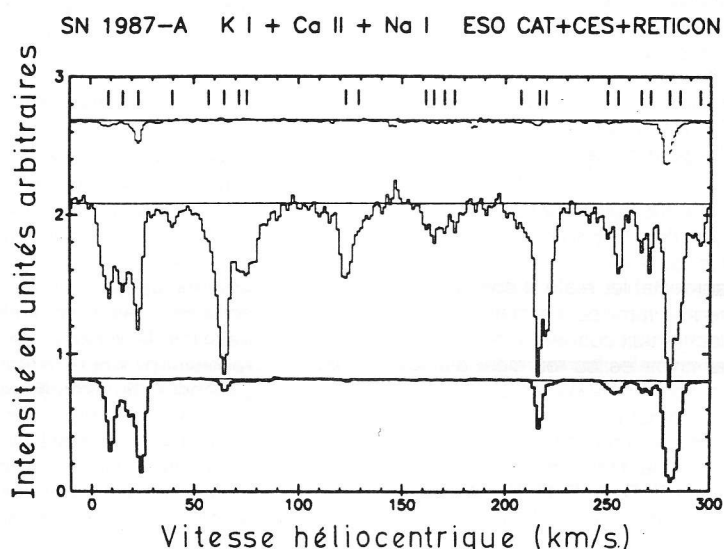
suivi l'explosion (circulaire n°4321), des observations faites après juillet 1987 au moyen d'un interféromètre australien très sensible n'ont pu mettre en évidence aucun signal radio en provenance de SN 1987A. L'émission radio observée aux environs du 25 février était probablement due à du rayonnement synchrotron provenant d'une mince couche de matière circumstellaire traversée par l'onde de choc. La faiblesse de cette émission radio confirme l'idée que le précurseur n'était pas entouré d'une couche très dense de gaz opaque au rayonnement radio, en accord avec l'hypothèse d'une supergéante bleue comme précurseur. En outre, alors que les supernovae de type II formées à partir de supergéantes rouges deviennent généralement lumineuses en radio quelques mois après l'explosion, on pense que cela se produira, pour SN 1987A, dans une trentaine d'années, au moment où l'onde de choc

radio à la suite de l'accélération turbulente des électrons. La détection d'un excès croissant de rayons X durs en provenance de SN 1987A, atteignant un maximum au début du mois de septembre 1987, suggère que de tels processus sont en train de se dérouler (circulaires UAI n°4447 et 4497).

De nombreux détecteurs sensibles au rayonnement X et  $\gamma$  emportés par des ballons et des fusées, ainsi que des télescopes optiques, infra-rouge et radio au sol situés dans l'hémisphère austral sont maintenant à l'écoute des premiers signes qui devraient accompagner le passage de l'onde de choc dans les couches les plus denses de la matière circumstellaire. Ils continuent aussi à détecter le rayonnement témoin de la nucléosynthèse explosive et sont prêts à capter la radiation en provenance de l'objet compact qui réside au centre de l'explosion.

Figure 11 - Raies interstellaires dans le spectre de SN 1987A

Des spectres à très haute résolution de SN 1987A ont révélé la présence de très nombreuses raies interstellaires et intergalactiques en absorption dues au potassium (K I, spectre du haut), au calcium (Ca II, milieu) et au sodium (Na I, spectre du bas). Au-dessus, les traits indiquent la position des 24 composantes interstellaires produites par l'absorption de la radiation de la supernova lors de son passage dans des nuages interstellaires plus froids. Selon la vitesse du nuage, la position d'une raie est déplacée dans le spectre par suite de l'effet Doppler. Les raies de faibles vitesses (vers la gauche) correspondent aux nuages de la Voie Lactée ; celles de droite, au-dessus de 250 km/s sont produites dans du gaz du GNM. Les raies intermédiaires sont vraisemblablement dues à de la matière située entre la Galaxie et le GNM. Ces spectres ont été obtenus avec le spectrographe Reticon CES du télescope CAT de 1,4 m (tiré d'un article de Vidal-Madjar et al. 1987, *Astronomy and Astrophysics*, 177, L17).



symétrique partiellement résolue autour de la supernova (circulaire UAI n° 4417 et 4481) aux mois de juin et août 1987. Le diamètre angulaire de cette structure a été évaluée à 41 millisecondes d'arc. Il s'agirait de matière éjectée par le précurseur lorsqu'il se trouvait dans une phase de perte de matière importante. L'émission de rayonnement infra-rouge s'expliquerait de nouveau par le phénomène d'écho.

Bien qu'une émission radio faible de courte durée ait été détectée à environ 1 GHz au cours des premiers jours qui ont

atteindra la matière du vent stellaire de la géante rouge située à une distance de l'ordre de  $10^{18}$  cm.

A partir de juillet 1987, des astrophysiciens observant à l'aide du satellite IUE ont annoncé l'apparition de raies en émission étroites dans le spectre de SN 1987A (circulaires UAI n° 4410 et 4435). Ils suggèrent que les changements spectraux observés sont dus à la raréfaction du gaz de la matière éjectée qui aurait rendu visible des couches plus profondes. Dans ce contexte, il est intéressant de noter que des variations de la polarisation de la lumière optique de SN 1987A, atteignant 3 à 4 %, ont été observées et suggèrent une hétérogénéité de l'atmosphère en expansion.

Les astrophysiciens travaillant avec IUE ont aussi proposé comme alternative que les raies étroites émises par le gaz enrichi en azote proviennent de matière interstellaire photoionisée par le rayonnement ultraviolet et optique qui ont accompagné l'arrivée de l'onde de choc dans la photosphère de la supernova. Dans ce cas, une interaction future entre les débris de cette matière et l'onde de choc devrait donner lieu à l'émission X et

L'étude observationnelle de SN 1987A a l'immense mérite de confirmer qualitativement le modèle théorique compliqué avancé pour expliquer les supernovae de type II. Mais elle fait aussi apparaître de nombreuses questions et il est certain que les observations futures nous permettront de pénétrer plus encore dans les mystères de cette supernova du vingtième siècle.

**Françoise NEMRY**  
Aspirant au Fonds National  
de la Recherche Scientifique

**Jean SURDEJ**  
Chercheur Qualifié au Fonds National  
de la Recherche Scientifique

Institut d'Astrophysique, Université  
de Liège  
Belgique

#### Remerciements

Nous remercions très vivement Arlette Noels pour les précieux conseils qu'elle nous a apportés lors de la rédaction de cet article.

## SUPERNOVAE : le "dossier" du siècle

De l'explosion d'une supernova à la recherche des supernovae par les amateurs : un dossier de 26 pages qui fait le point précis sur ces éphémères splendeurs du firmament.

**Pulsar n° 654 (mai-juin 1986)**

en vente à la S.A.P. 30 F  
(franco de port).